

**Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ****ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЗАМКНУТЫХ СВАРНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

При проектировании технологии производства замкнутых сварных гнутых профилей возможность определения основных параметров очага деформации (длину и форму на участке перед сварочной клетью), безусловно является фактором, который позволяет обеспечить стабильность и качество сварного шва. Параметры очага деформации позволяют рассчитать расстояние от шово-направляющей клетки до сварочной клетки, при котором обеспечиваются необходимые условия для осуществления процесса высокочастотной сварки (угол схождения кромок и очаг деформации профиля), что способствует повышению продольной устойчивости профиля. Это особенно важно при производстве тонкостенных профилей, наиболее подверженных волнообразованию на кромках, которое существенно затрудняет процесс образования сварного соединения или вообще исключает его возможность. В работе использован вариационный метод, основанный на принципе минимума энергии упругой деформаций (минимума работы деформирования). В литературе нет данных и рекомендаций, которыми можно было бы воспользоваться при решении подобных задач. До последнего времени параметры профиля и конструкции оснастки, а также взаимное расположение формирующей и сварочной клеток определяли эмпирически. Результаты, полученные в работе, позволяют установить форму очага деформации профиля перед сваркой и обеспечивают необходимое расположение конструктивных элементов клеток, формы, а также размеры индукторов и ферритовых оправок.

**Ключевые слова:** профили замкнутые сварные, параметры очага деформации, расположение клеток, форма индукторов, форма ферритовых оправок.

**Ю.О. ПЛЕСНЕЦОВ****ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОСЕРЕДКА ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ  
ВИРОБНИЦТВІ ЗАМКНУТИХ ЗВАРНИХ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ**

При проектуванні технології виробництва замкнутих зварних гнутих профілів можливість визначення основних параметрів осередку деформації (довжини і форми на ділянці перед зварювальною кліттю), безумовно є фактором, який дозволяє забезпечити стабільність і якість зварного шва. Параметри осередку деформації дозволяють розрахувати відстань від шово-направляючої кліті до зварювальної кліті, при якому забезпечуються необхідні умови для здійснення процесу високочастотного зварювання (кут сходження кромок і осередок деформації профілю), що сприяє підвищенню поздовжньої стійкості профілю. Це особливо важливо при виробництві тонкостінних профілів, найбільш схильних до хвилювання на крайках, яке істотно ускладнює процес утворення зварного з'єднання або взагалі виключає його можливість. У роботі використаний варіаційний метод, заснований на принципі мінімуму енергії пружної деформації (мінімуму роботи деформування). У літературі немає даних і рекомендацій, якими можна було б скористатися при вирішенні подібних задач. До останнього часу параметри профілю і конструкції оснастки, а також взаємне розташування формируючої і зварювальної клітей визначали емпірично. Результати, отримані в роботі, дозволяють встановити форму осередку деформації профілю перед зварюванням і забезпечують необхідне розташування конструкційних елементів клітей, форми, а також розміри індукторів і феритових оправок.

**Ключові слова:** профілі замкнуті зварні, параметри осередку деформації, розташування клітей, форма індукторів, форма феритових оправок.

**YU.A. PLESNETSOV****DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE DEFLECTION  
CENTER FOR THE PRODUCTION OF CLOSED WELDED BENDED PROFILES**

When designing the production technology of closed welded bent profiles, the ability to determine the main parameters of the deformation zone (length and shape in the area in front of the welding stand) is certainly a factor that ensures the stability and quality of the weld. The parameters of the deformation zone allow us to calculate the distance from the seam-guide stand to the welding stand, at which the necessary conditions for the high-frequency welding process (the angle of convergence of the edges and the profile deformation zone) are provided, which helps to increase the longitudinal stability of the profile. This is especially important in the production of thin-walled profiles, the most prone to wave formation at the edges, which greatly complicates the process of formation of a welded joint or even eliminates its possibility. The variational method based on the principle of the minimum energy of elastic deformation (minimum work of deformation) is used in the work. There are no data and recommendations in the literature that could be used to solve such problems. Until recently, the parameters of the profile and tooling design, as well as the relative position of the forming and welding stands, were determined empirically. The results obtained in this work allow us to establish the shape of the deformation zone of the profile before welding and provide the necessary arrangement of the structural elements of the stands, the shape, as well as the dimensions of the inductors and ferrite mandrels.

**Keywords:** closed welded profiles, parameters of the deformation zone, stand arrangement, shape of inductors, shape of ferrite mandrels

**Введение.** При проектировании технологии производства замкнутых сварных гнутых профилей возможность определения основных параметров очага деформации – таких, как длина и форма на участке перед сварочной клетью, безусловно является фактором, который позволяет обеспечить стабильность и качество сварного шва.

**Актуальность работы.** Параметры очага деформации позволяют рассчитать расстояние от шово-направляющей клетки до сварочной, при котором

обеспечиваются необходимые условия для осуществления процесса высокочастотной сварки (угол схождения кромок и очаг деформации профиля) [1, 2]. Последнее способствует повышению продольной устойчивости профиля. Это особенно важно при производстве тонкостенных профилей [3-9], наиболее подверженных волнообразованию на кромках, которое существенно затрудняет процесс образования сварного соединения или вообще исключает его возможность. В литературе нет данных и рекомендаций, которыми можно было бы

воспользоваться при решении подобных задач. До последнего времени параметры профиля и конструкции оснастки, а также взаимное расположение формующей и сварочной клетей определяли эмпирически.

**Цель работы** – установление формы свободного очага деформации профиля перед сваркой необходимо для обеспечения формы поперечного сечения профиля перед сваркой, расположения и формы конструктивных элементов клетей, формы и размеров индукторов, ферритовых оправок и т.п.

**Методика выполнения исследований.** Для достижения поставленной цели в работе использован вариационный метод, основанный на принципе минимума энергии упругой деформаций (минимума работы деформирования).

В работе на основе теории профилирования [1, 2] выделены основные виды упругих деформаций при обжатии профиля в сварочном калибре, вариационным методом получены выражения для определения энергии, необходимой для осуществления каждой из упругих деформаций, для полной упругой энергии деформации профиля в таком виде, чтобы они включали в себя неизвестную функцию, описывающую форму очага деформации, определен вид этой функции, соответствующий минимуму полной упругой энергии, и, тем самым установлена

форма очага деформации; после чего определены длина очага деформации и угол схождения кромок профиля.

В качестве допущения принято, что вследствие малости угловых перемещений элементов профиля при формовке их до конечного положения на участке перед сваркой (до  $6^\circ$ ) свободный очаг деформации образуется только в результате упругого формоизменения профиля.

### Результаты исследований.

#### 1. Формоизменение профиля в очаге деформации.

Формоизменение профиля при обжатии упрощенно можно представить следующим образом.

Под действием усилий  $P_1$  полки подгибаются вниз и затем стыкуются усилиями  $P_2$  (рис. 1, а). Предполагается, что усредненные радиусы закруглений  $R_1$  и  $R_2$  отличаются друг от друга. За пределами области приложения усилий  $P_1$  и  $P_2$  образуется свободный очаг деформации, характеризующийся длиной  $L$  и углом схождения кромок профиля  $\alpha$  (рис. 1, б). Изменение формы сечения профиля сопровождается незначительным продольным искривлением, которым можно пренебречь. Под действием моментов от внешних сил нижняя стенка профиля испытывает изгиб в поперечно-осевой плоскости (рис. 2).

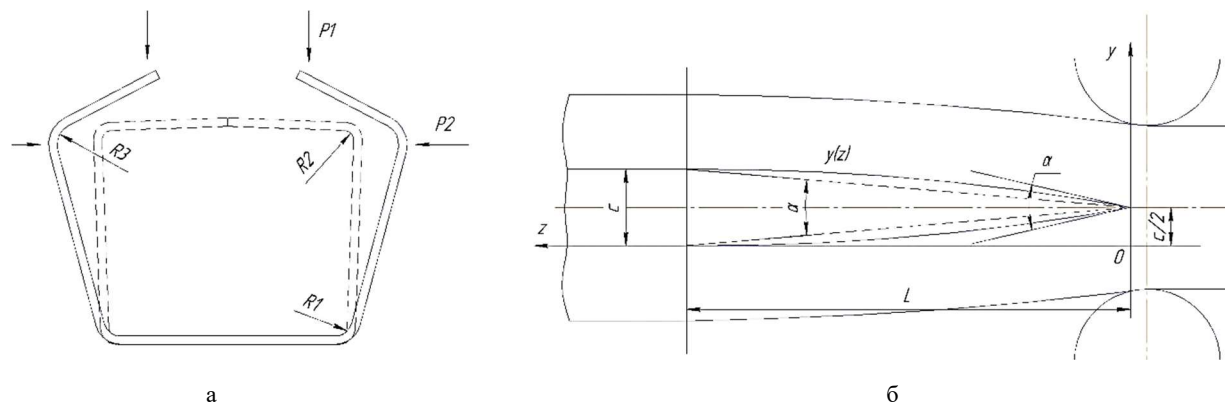


Рис. 1 – Характер формоизменения поперечного сечения профиля при обжатии: а – под действием усилий  $P_1$  полки подгибаются вниз и затем стыкуются усилиями  $P_2$ ; б – свободный очаг деформации (длиной  $L$  и углом схождения кромок профиля  $\alpha$ ) за пределами приложения усилий  $P_1$  и  $P_2$

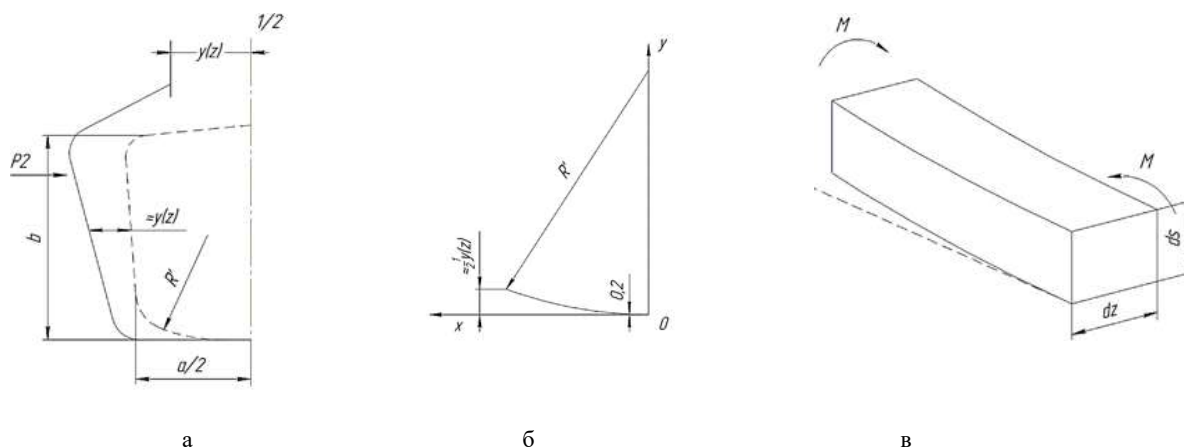


Рис. 2 – Расчетная схема для определения энергии упругого изгиба нижней стенки профиля: а – перемещение кромки на расстояние  $y(z)$  под действием усилия  $P_2$ ; б – показан изогнутый элемент нижней стенки с радиусом кривизны  $R'(z)$ ; в –

схема нижней стенки профиля в виде совокупности элементарных, балок прямоугольного сечения с площадью  $ds \cdot dz$ , изгибаемых моментом  $M$

Относительно боковых стенок с достаточной степенью точности можно принять, что при обжатии они перемещаются, сохраняя первоначальную форму, и, следовательно, испытывают преимущественно деформацию продольного растяжения. То же самое относится и к полкам, которые после подгибки вниз перемещаются навстречу друг другу.

Таким образом, в качестве основных видов упругого деформирования профиля перед сварочным калибром можно выделить **изгиб нижней стенки в поперечно-осевой плоскости** и **продольное растяжение боковых стенок и полков**, то есть задача сводится к получению выражений для указанных видов упругого деформирования профиля с учетом формы очага деформации, подлежащей определению.

## 2. Определение упругой энергии в очаге деформации.

**Энергия изгиба.** Схемы к расчету энергии упругого изгиба нижней стенки профиля, соответствующие изложенным выше упрощениям характера формоизменения, представлены на рис. 2 (ввиду симметрии сечения профиля рассматривается его половина). На рис. 1, б дана общая схема формирования очага деформации длиной  $L$  на полках профиля. Изменение расстояния между кромками по длине очага деформации и, следовательно, его форма характеризуются некоторой функцией  $y(z)$ , которая, как видно из рис. 1, б, удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$y(z=0) = \frac{c}{2}, y(z=L) = 0, y'_z(z=L) = 0, \quad (1)$$

где  $c$  – первоначальная величина зазора между кромками профиля.

Третье из условий (1) означает отсутствие каких-либо особых точек по длине очага деформации, поскольку на этом участке не прикладывается никаких внешних усилий. Очевидно, что текущая величина зазора  $2\delta(z)$  связана с функцией  $y(z)$  следующим образом:

$$2\delta(z) = c - 2y(z); 2\delta(0) = 0; 2\delta(L) = c. \quad (2)$$

Из рис. 2, а следует, что перемещение кромки на расстояние  $y(z)$  под действием усилия  $P_2$  приводит к «жесткому» смещению боковой стенки и, соответственно, к изгибу нижней стенки до некоторого радиуса кривизны  $R'$  величина которого различна в разных сечениях очага деформации, то есть  $R'=R'(z)$ , причем  $R'(0)=R_{\min}$ ,  $R'(L)=\infty$ . Отсюда следует, что  $R'$  зависит от  $y(z)$  и в первом приближении  $R'(z) \sim [y(z)]^{-1}$ . На рис. 2, б показан изогнутый элемент нижней стенки с радиусом кривизны  $R'(z)$ . При небольшом искривлении нижней стенки дугу окружности радиуса  $R'$  приближенно можно представить отрезком параболы; из уравнения окружности  $x^2 + (R' - y)^2 = (R')^2$  (см. рис. 2, б)

$$y = R' - \sqrt{(R')^2 - x^2} = R' - R' \sqrt{1 - \frac{x^2}{(R')^2}} \approx R' - R' \left[ 1 - \frac{x^2}{2(R')^2} \right] = \frac{x^2}{2R'}. \quad (3)$$

Из приближенного геометрического соотношения (см. рис. 2, а и рис. 3) находим

$$y\left(\frac{a}{2}\right) \approx \frac{1}{2}y(z) = \frac{a^2}{8R'}.$$

Откуда

$$R' = R'(z) = \frac{a^2}{4y(z)}. \quad (4)$$

Представим теперь рассматриваемую половину нижней стенки профиля в качестве совокупности элементарных, балок прямоугольного сечения с площадью  $s \cdot dz$  (рис. 2, в), изгибаемых моментом  $M(z)$ . Согласно (4), в соответствии с известным соотношением для чистого изгиба

$$\frac{1}{R'} = \frac{M}{EI}, \quad (5)$$

где  $I$  – момент инерции сечения

$$I = \frac{s^3 dz}{12} \quad (6)$$

находим

$$\frac{M(z)}{EI} = \frac{4y(z)}{a^2}. \quad (7)$$

Используя известную формулу для энергии упругого изгиба

$$U_{\text{изг}} = \int_{(l)} \frac{M^2 dl}{2EI}, \quad (8)$$

получим выражение для энергии изгиба элемента стенки в виде

$$dU_{\text{изг}} = \frac{M^2(z)l}{2EI} = \frac{M^2(z)a}{4EI} = \frac{M^2 z a}{EI} \cdot \frac{1}{4} = \frac{4y(z)}{a^2} \cdot \frac{a}{4} \cdot \frac{1}{4} \cdot 4EI \frac{y(z)}{a^2} = \frac{4E}{a^3} y^2(z) \frac{s^3 dz}{12} = \frac{1}{3} \left( \frac{s}{a} \right)^2 E y^2(z) dz. \quad (9)$$

Тогда энергия упругой деформации изгиба для всей половины нижней стенки определяется формулой

$$U_{\text{изг}} = \int_0^L \frac{1}{3} \left( \frac{s}{a} \right)^2 E y^2(z) dz = \frac{1}{3} \left( \frac{s}{a} \right)^2 E \int_0^L y^2(z) dz \quad (10)$$

в которую входит неизвестная функция  $y(z)$ , описывающая форму очага деформации.

**Энергия деформаций растяжения.** Основной вклад в эту деформацию составляет растяжение отдельных элементов с площадью сечения  $F=s \cdot db$  (рис. 3, а); искривлением их в первом приближении можно пренебречь. Для наглядности удлинение этих элементов показано также в плане (рис. 3, б). В упругой зоне, согласно закону Гука, относительное удлинение

$$\frac{\Delta dz}{dz} = \frac{N}{EF}, \quad (11)$$

где  $N$  – нормальное усилие, направленное вдоль элемента.

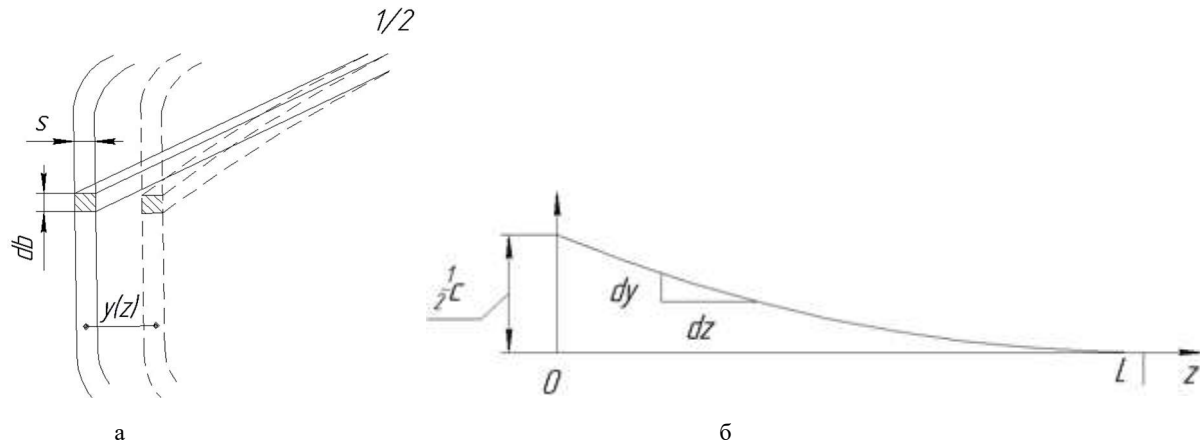


Рис. 3 – Расчетная схема упругого растяжения боковой стенки: а – растяжение отдельных элементов (площадь сечения  $F=s \cdot db$ ); б – растяжение при  $\frac{dy}{dz} \ll 1$

Согласно рис. 3, б (при  $\frac{dy}{dz} \ll 1$ ) можно приближенно записать

$$\frac{\Delta dz}{dz} = \frac{\sqrt{dy^2 + dz^2} - dz}{dz} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2} - 1 = \sqrt{1 + (y'_z)^2} - 1 \approx 1 + \frac{1}{2}(y'_z)^2 - 1 = \frac{1}{2}(y'_z)^2. \quad (12)$$

Используя известные соотношения теории упругости, можно определить энергию упругой деформации растяжения элемента боковой стенки:

$$dU_{\text{раст}}^{\text{б.ст}} = \int_0^L \frac{N^2 dz}{2EF} = \int_0^L \frac{N}{EF} \frac{N}{2} dz = \int_0^L \frac{\Delta dz}{dz} \frac{1}{2} EF \frac{\Delta dz}{dz} dz = \int_0^L \left[ \frac{1}{2} (y'_z)^2 \right]^2 \frac{1}{2} Esdb dz = \frac{1}{8} Esdb \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (13)$$

При допущении о «жестком» перемещении боковой стенки при (интегрировании по ее высоте), получаем

$$\int_0^b db = b,$$

откуда энергия деформации боковой стенки составит

$$U_{\text{раст}}^{\text{б.ст}} = \frac{1}{8} Esdb \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (14)$$

Аналогичным способом определяем энергию деформации полки.

Для этой цели выделяем отдельные элементы с площадью поперечного сечения  $s \cdot da$  (рис. 4). Расчетная схема (см. рис 3, б) применима и в данном случае. Обозначив ширину полки через  $\frac{a}{2}$ , по аналогии с (11-14) определяем энергию упругого растяжения полки

$$U_{\text{раст}}^{\text{п}} = \frac{1}{8} Es \frac{a}{2} \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (15)$$

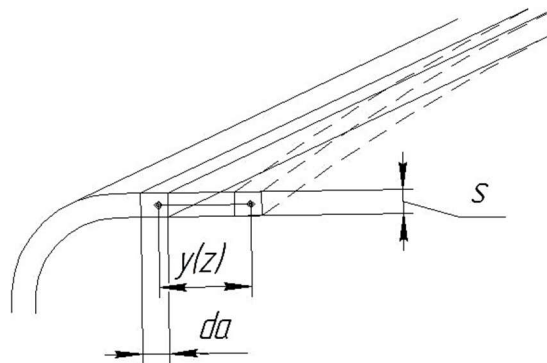


Рис. 4 – Расчетная схема для определения энергии упругого растяжения полки

Суммарная энергия растяжения боковой стенки и полки

$$U_{\text{раст}} = \frac{1}{8} Es \left( \frac{a}{2} + b \right) \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (16)$$

#### Полная упругая энергия в очаге деформации.

Суммируя (10) и (16), получаем формулу для определения полной энергии упругой деформации рассматриваемой половины профиля

$$U = \frac{1}{3} \left( \frac{s}{a} \right)^3 E \int_0^L y^2(z) dz + \frac{1}{8} Es \left( \frac{a}{2} + b \right) \int_0^L (y'_z)^4 dz. \quad (17)$$

В это выражение входит неизвестная функция  $y(z)$ , описывающая форму очага деформации; она подлежит определению путем отыскания минимума функционала (17).

### 3. Определение формы очага деформации.

Для удобства выполнения дальнейших расчетов представим (17) в виде

$$U = \int_0^L [K_1 y^2 + K_2 (y'_z)^4] dz, \quad (18)$$

где  $K_1 = \frac{1}{3} \left( \frac{s}{a} \right)^3 E$ ;

$$K_2 = \frac{1}{8} E s \left( \frac{a}{2} + b \right). \quad (19)$$

Задача состоит в нахождении функции  $y(z)$ , при котором величина полной энергии деформации  $U$  будет соответствовать минимуму.

Функционал  $\int_a^b F(x; y; y') dx$  стремится к минимуму, если функция удовлетворяет уравнению Эйлера

$$Fy - \frac{d}{dx} Fy' = 0.$$

Если  $F$  не содержит  $x$ , то это уравнение включает первый интеграл:

$$F - y' Fy' = \text{const.}$$

В рассматриваемом случае это соотношение принимает вид

$$K_1 y^2 + K_2 (y')^4 - y' \cdot 4K_2 (y')^3 = \text{const}, \quad (20)$$

или

$$K_1 y^2 - 3K_2 (y')^4 = \text{const}. \quad (21)$$

При третьем из граничных условий (1), а именно  $y'=0$  при  $y=0$ ,  $\text{const}$  обращается в нуль, поэтому (21) можно привести к виду

$$K_1 y^2 = 3K_2 (y')^4. \quad (22)$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение для функции  $y(z)$

$$y' = \frac{dy}{dx} = -\sqrt[4]{\frac{K_1}{3K_2}} \sqrt{y}. \quad (23)$$

Знак «минус» выбираем из очевидного требования  $y' < 0$ . Решение этого уравнения, с учетом

граничных условий (1), обеспечило получение функции вида

$$\sqrt{y(z)} = \sqrt{\frac{c}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_1}{3K_2}}} z. \quad (24)$$

Тем самым описание формы очага деформации (см. рис. 1, б) может быть представлено в виде функции  $y(z)$ .

### 4. Определение длины очага деформации.

Из условия (1), а именно  $y(z=L)=0$ , и (24), получаем:

$$\sqrt{\frac{c}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_1}{3K_2}}} L = 0. \quad (25)$$

Отсюда длина очага деформации

$$L = \sqrt{2c} \cdot \sqrt[4]{\frac{3K_2}{K_1}}. \quad (26)$$

Подставляя значения  $K_1$  и  $K_2$  (согласно (19)), окончательно получим

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{6c}{s}} \sqrt[4]{a^3(a+2b)}. \quad (27)$$

В частности, для профиля квадратного сечения ( $b=a$ ), получаем зависимость вида

$$L = \frac{\sqrt[4]{3}}{2} a \sqrt{\frac{6c}{s}}. \quad (28)$$

Приближенно длину очага деформации можно определять по зависимости

$$L \approx \frac{1}{\sqrt{s}}.$$

Замеры длины очага деформации при освоении замкнутого сварного профиля 80x80x0,8 мм при  $c=4$  мм показали численное значение  $L \approx 310$  мм (рис. 5). Расчетное значение длины очага деформации по формуле (28) для указанного профиля составляют  $L \approx 290$  мм (расхождение  $\approx 7\%$ ), что приемлемо для практического использования.



Рис. 5 – Замкнутый сварной профиль 80x80x0,8 мм

### 5. Определение угла схождения кромок

Поскольку угол схождения кромок, как правило, мал, расчет проведен следующим образом: введя

текущую величину зазора  $2\delta(z)$  и используя выражения (2) и (24), получим

$$\delta(z) = \frac{c}{2} - \left( \sqrt{\frac{c}{2}} - \frac{1}{2} c_0 z \right)^2 = \sqrt{\frac{c}{2}} c_0 z - \frac{c_0^4}{4} z^2, \quad (29)$$

$$\text{где } c_0 = \sqrt[4]{\frac{K_1}{3K_2}}. \quad (30)$$

Величина  $\left. \frac{d\delta(z)}{dz} \right|_{z=0}$  позволяет получить

зависимость  $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$  или, ввиду малости угла

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}.$$

Учитывая (29), находим зависимость для определения угла схождения кромок

$$\frac{\alpha}{2} \approx \left. \frac{d\delta(z)}{dz} \right|_{z=0} = \left( \sqrt{\frac{c}{2}} c_0 - \frac{c_0^2}{2} z \right) \Big|_{z=0} = \sqrt{\frac{c}{2}} c_0, \quad (31)$$

откуда

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{c}{2}} c_0 = \sqrt{2c} \cdot c_0. \quad (32)$$

Из (26) и (30)

$$c_0 = \sqrt[4]{\frac{K_1}{3K_2}} = \frac{\sqrt{2c}}{L}. \quad (33)$$

Решая совместно (33) и (32), получим

$$\alpha \approx \frac{2c}{L}. \quad (34)$$

Отношение  $\frac{c}{L}$  определяет угол схождения, который соответствует линейной форме очага деформации. С учетом изложенного, формула (34) принимает вид

$$\alpha = 2\bar{\alpha}; \quad \bar{\alpha} = \frac{c}{L}. \quad (35)$$

### Выводы

1. При разработке технологии производства новых сварных замкнутых гнутых профилей по заданным параметрам их сечений перед сваркой необходимо определить длину и форму очага деформации, что обеспечит обоснованный выбор расстояния от шовнаправляющей (перемещаемой) клетки до сварочной (неподвижной) клетки при условии обеспечения стесненного очага деформации (длиной  $\approx 10\%$  меньше длины очага деформации).

2. Полученная зависимость (24) позволяет определить форму сечения профиля на участке установки индуктора и оптимальные размеры внутреннего (рабочего) пространства последнего. Что обеспечивает устранение потерь времени на

настройку профилегибочного оборудования. Проектируемая в рассматриваемом случае технологическая оснастка имеет оптимальные характеристики, что повышает коэффициент полезного действия и стабильность процесса.

### Список литературы

1. Тришевский И.С., Докторов М.Е. Теоретические основы процесса профилирования. – Москва: Металлургия, 1980. – 288 с.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности). – Москва: Металлургия, 1980. – 456 с.
3. Тришевский И.С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов и др. – Киев: Техника, 1980. – 168 с.
4. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технологии. / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин и др. – Москва: Металлургия, 1982. – 384 с.
5. Тришевский И.С., Клепанда В.В. Металлические облегченные конструкции. – Киев: «Будівельник», 1978. – 112 с.
6. Тришевский И.С. Гнутые профили проката. Справочник / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов и др. – Москва: Металлургия, 1980. – 352 с.
7. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марьин, В.А. Хмель. – Киев: Техника, 1985. – 128 с.
8. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 p.
9. Марковцев В.А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 244 с.

### References (transliterated)

1. Trishevskij I.S. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutyh profilej prokata / I.S. Trishevskij, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov i dr. – Kiev: Tehnika, 1980. – 168 p.
2. Trishevskij I.S. Proizvodstvo gnutyh profilej. Oborudovanie i tehnologii. / I.S. Trishevskij, A.B. Yurchenko, V.S. Marin i dr. – Moscow: Metallurgiya, 1982. – 384 p.
3. Trishevskij I.S., Doktorov M.E. Teoreticheskie osnovy processa profilirovaniya. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 288 p.
4. Trishevskij I.S. Gnutye profili prokata. Spravochnik / I.S. Trishevskij, V.I. Miroshnichenko, V.P. Stukalov i dr. – Moscow: Metallurgiya, 1980. – 352 p.
5. Trishevskij I.S. Proizvodstvo detalej iz gnutyh profilej / I.S. Trishevskij, V.S. Marin, V.A. Hmel. – Kiev: Tehnika, 1985. – 128 p.
6. Rashnikov V.F. Proizvodstvo gnutyh profilej na Magnitogorskom metkombinate / V.F. Rashnikov, M.F. Safronov, V.L. Kornilov i dr. – Magnitogorsk: MGTU, 1999. – 157 p.
7. Safronov M.F. Proizvodstvo i ekspluatatsiya valkov na metallurgicheskom predpriyatii / M.F. Safronov, V.G. Antipanov, V.L. Kornilov i dr. – Magnitogorsk: MGTU, 1999. – 92 s.
8. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 p.
9. Filimonov S.V. Intensivnoe formoobrazovanie gnutyh profilej / S.V. Filimonov, V.I. Filimonov. – Ulyanovsk: UIGTU, 2008. – 444 p.
10. Filimonov S.V. Metod, raschety i tehnologiya intensivnogo deformirovaniya v rolakah gnutyh profilej tipovoj nomenklatury / S.V. Filimonov, V.I. Filimonov. – Ulyanovsk: UIGTU «Venec», 2004. – 246 p.
11. Markovcev V.A. Formoobrazovanie stesennym izгибом v rolakah i pravka gnutyh tonkostennyh profilej / V.A. Markovcev, V.I. Filimonov. – Ulyanovsk: UIGTU, 2006. – 244 p.

Поступила (received) 18.10.2019

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Плеснецов Юрий Александрович (Плеснецов Юрий Александрович, Plesnetsov Yuriy Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри «Комп'ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: plesnetsov@gmail.com